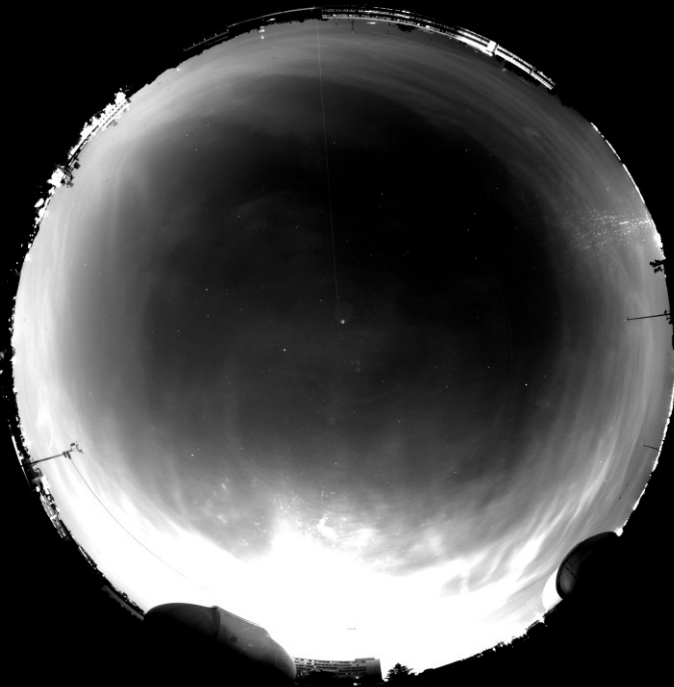


Variación del brillo del fondo de cielo en el cénit con la fase y altura de la Luna



Universidad
Complutense de
Madrid

Trabajo de Fin de
Grado en CC. Físicas

Dirigido por: Jaime
Zamorano

Dep. Astrofísica y CC.
De la Atmósfera UCM

Alejandro Sánchez de Miguel

Análisis de la evolución de brillo de fondo de cielo en el zenit en el Observatorio UCM durante las noches del mes de julio de 2012 y su relación con la altura y la fase de la Luna. El estudio se ha realizado con El dispositivo AstMon-UCM en la banda V de Johnson. Se ha podido determinar que existe una relación lineal entre la altura de la luna y el brillo de fondo de cielo para las noches estudiadas. La evolución con la fase ha dicho más difícil estudiar su relación debido a la coincidencia con un evento de aumento de los aerosoles. La evolución media de las noches con luna y sin luna vienen marcadas por la presencia o ausencia de luna y el normal decaimiento del brillo de fondo de cielo, debido al apagado de luces ornamentales en la ciudad y otras fuentes correlacionadas con el consumo general de energía eléctrica.

Contenido

1	Introducción:	2
2	Descripción del instrumento y del set de datos.....	3
2.1	El AstMon – UCM	3
2.2	El set de datos	3
3	Aspectos teóricos de importancia en el estudio del Brillo de fondo de cielo:.....	5
4	Medida de las imágenes.....	6
5	Efemérides	8
6	Análisis de las medias.....	9
6.1	Variación Brillo de fondo de Cielo con la Fase y la Altura de la Luna en noches claras: 13	
6.1.1	Relación entre el brillo de fondo de cielo con la altura.	13
6.1.2	Relación del brillo de fondo de cielo con la fase.....	14
6.2	Variación del brillo de fondo de cielo por la luna en noches en las que la cámara estaba sucia.....	16
7	Variación del brillo de fondo de cielo en el zenit con la profundidad óptica por aerosoles. 17	
8	Evolución del brillo de fondo de cielo medio.....	21
9	Conclusiones y trabajo futuro:	23
	Apéndices:	24
10	Figuras de algunos artículos citados.	24
10.1	Cambio de brillo de fondo de cielo en varias ciudades:.....	24
10.1.1	Viena:.....	24
10.1.2	Hong Kong:	24
10.1.3	Berlin:	25
10.2	Otras figuras	25
11	Bibliografía:	26

Variación del brillo del fondo de cielo en el cénit con la fase y altura de la Luna

1 Introducción:

La cantidad de luz en el ambiente es uno de los factores que más influyen en tanto en el ser humano como en el medio ambiente. Tradicionalmente las únicas fuentes de luz en la Tierra fueron durante millones de años el Sol, la Luna y las estrellas, luego excepcionalmente, las auroras, los rayos, el fuego de los incendios, algunos fenómenos de bioluminiscencia y otros fenómenos celestes poco frecuentes e impredecibles. De esta manera, los ciclos biológicos de las plantas, los animales y los humanos están regulados por la presencia de estas fuentes de luz. Un ejemplo es como las especies que se alimentan de forraje alteran sus trayectos durante las noches de luna llena ⁱ

La fuente principal de luz y reguladora de los ciclos biológicos es el Sol. Con una luminosidad de 1 KW m^{-2} es la fuente más intensa de luz de que disponemos e incluso, a los seres humanos nos resulta muy costoso reproducir de manera artificial esos niveles de iluminación.

La siguiente fuente de luz natural en importancia es la Luna. Su influencia está demostrada en numerosas especies animales que sincronizan sus ciclos reproductivos con la presencia de la Luna. La influencia en los seres humanos ha sido de siempre muy discutida, si bien su presencia en todas las culturas es innegable. Representando en todas las culturas deidades, ayudas, leyendas y poesías. Aun no son pocos que en la agricultura siguen defendiendo el efecto de la Luna sobre las cosechas, como el vino o como algunos investigadores serios se plantean la posibilidad de que la sincronización entre partos y la fase lunar se haya perdido en la actualidad, pero existiera en el pasado cuando los seres humanos trabajaban en el campo y en un medio ambiente alejado de la luz artificial. Y es que el brillo que proporciona la luna es relativamente fácil de eclipsar de manera artificial, la iluminancia de una superficie iluminada por la luna llena es típicamente solo de 0.5 lux, frente a los 32 klux de una superficie iluminada por el Sol. Cualquier calle de la más lúgubre ciudad española tiene más iluminación de 1.5 lux según la normativa española.

De esta manera, la luminosidad de la Luna en las ciudades ha perdido totalmente su importancia. Así, los humanos auto perturbamos de manera inconsciente nuestros ciclos biológicos. Mucho más que eso, con nuestra iluminación artificial afectamos también a los ciclos de los animales y plantas que viven alrededor nuestro. Los investigadores Pusching et al. 2013ⁱⁱ pudieron constatar como el ciclo de luminosidad natural de la luna era irreconocible en una gran ciudad con Viena. En este trabajo vamos a estudiar como varía el brillo de fondo de cielo en el zenit para la ciudad de Madrid durante el mes de julio del año 2012 con el objetivo de cuantificar y estudiar si es posible que dicho ciclo se vea afectado también en la ciudad de Madrid.

Este estudio facilitará el análisis posterior de la toma de medidas con otros instrumentos que no proporcionan resolución espacial, tal y como el SQM, ya que en la actualidad los mapas de brillo de fondo de cielo se elaboran solo en noches sin Luna.

2 Descripción del instrumento y del set de datos

2.1 El AstMon – UCM

El ASTMON de sus siglas en inglés All Sky Transmission Monitorⁱⁱⁱ es el instrumento que vamos a utilizar para la medida de brillo de fondo de cielo. Fue construido por la empresa iTecAstronómica S.L. e instalado y comisionado durante el trabajo académicamente dirigido de Pablo Ramírez Moreta^{iv}. En dicho trabajo se detalla de manera exhaustiva las funcionalidades y ajustes del AstMon, por lo que en esta sección no entraremos en tantos detalles, pero sin embargo si hay que destacar algunos que serán de importancia para el desarrollo de la discusión de los resultados.

AstMon consiste esencialmente de una cámara QSI 583ws con chip CCD KODAK KAF-8300 de 8.3 megapíxeles. Como objetivo utiliza un Sigma 4.5 mm F2.8 EX DC HSM Circular Fisheye. Dicha cámara está equipada con una rueda de filtros BVR de Johnson para la toma de imágenes en 3 bandas fotométricas. Puede leerse una descripción exhaustiva en el trabajo académicamente dirigido de Miguel Nievas^v. Además de la cámara existe otro elemento óptico adicional, que es la cúpula semiesférica transparente. Tal y como comenta Nievas en su trabajo, el objetivo se ha procurado colocar el objetivo en el centro de la misma para evitar distorsiones. Pero la importancia de la citada cúpula no es tanto la presencia de dichas distorsiones, como la de cómo también comenta Nievas, la acumulación de polvo y la gran cantidad de reflejos que produce. Parte de este trabajo consistirá en determinar el efecto de esta acumulación de polvo en las imágenes.

Este instrumento proporciona imágenes calibradas en flujo por diversos métodos.

Método 1 – software del AstMon.

Método 2 – software Nievas (2012)

2.2 El set de datos

El set de datos está compuesto por imágenes en la banda V de Johnson de las fechas comprendidas entre el 2 de julio de 2012 a las 21h 36 m y 56s TU al día 1 de agosto de 2012 a las 3 h 34 m 38 TU. Dichas imágenes están en formato FITS^{vi} (Flexible Image Transport System) de acuerdo con las normas de la Unión Astronómica Internacional. Este formato permite un almacenamiento de la información sin pérdidas. De la cabecera de las imágenes puede deducirse que los ficheros tienen un tamaño de 2500 px x 2500 px. Presentan datos en formato de 16 bits. El tiempo de exposición para todas las imágenes es de 40 seg.

Mediante inspección visual se pueden establecer, dentro del set de datos podemos distinguir cuatro tipos de imágenes o noches con respecto al estado de la atmósfera y/o el instrumento.

Despejadas/Limpias: En las que no se aprecia apenas variaciones bruscas de fondo de cielo.

Cirros: Las variaciones son más acusadas, pero no tanto como en los momentos en los que existe la presencia de nubes medias o bajas.

Polvoriento: No apreciamos variaciones bruscas, pero vemos como la cantidad de irregularidades en la imagen deja claro que hay polvo en la cúpula de metacrilato.

Errores: Son imágenes en negro o de menor tiempo de exposición de lo habitual.

Tabla 1 Clasificación de las noches

Tipos	Limpias	Cirros	Polvo	Nubes	Errores
Noches/Imágenes	05, 06, 07, 08, 09, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 24	02, 21, 22, 23,25, 27, 28	27, 28, 29, 30, 31, 01	03, 04, 16, 26	10, 08_0803071, 14-031338, 17-031616

Más adelante estudiaremos como afectan las citadas características a las medidas de brillo de fondo de cielo.

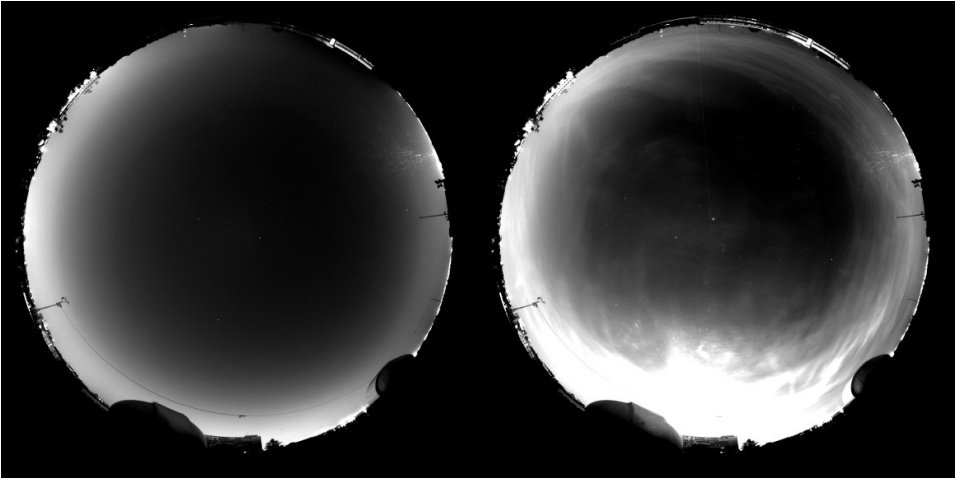


Figura 1 Imagen 20120714_031338- Limpia, imagen 20120702_225900 – Cirros

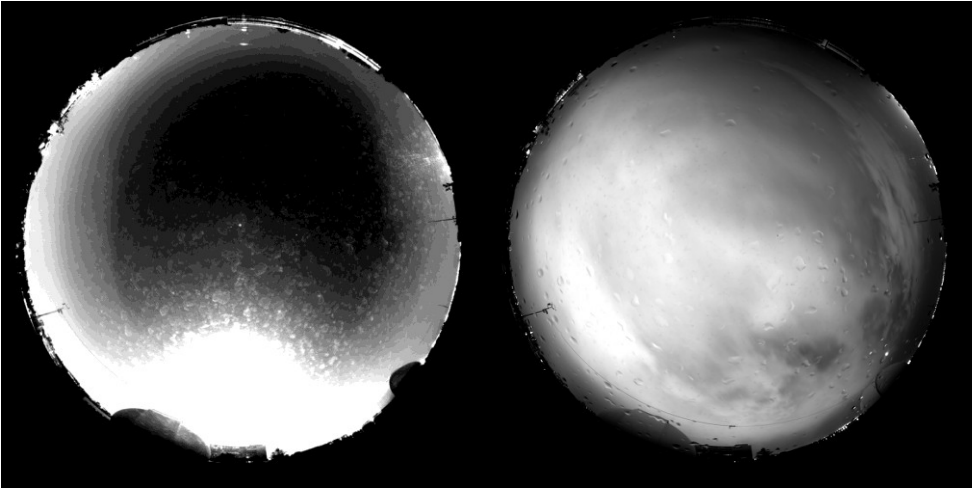


Figura 2 Imagen 20120801_235938 – Polvo, imagen V20120726_220720 Nubes

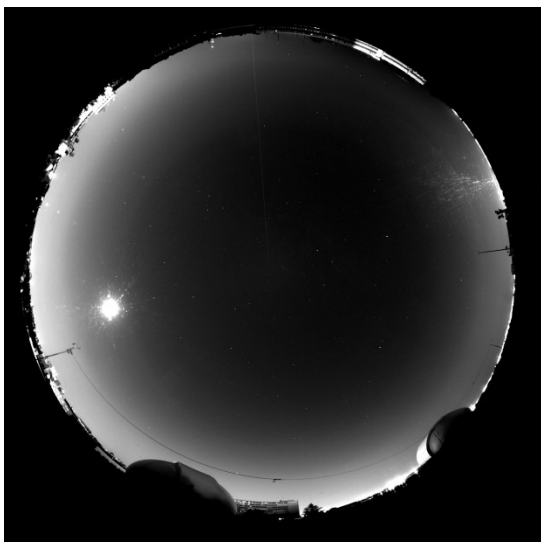


Figura 3 Imagen 20120714_031338 – Error, Cuentas 1/3 de lo normal.

3 Aspectos teóricos de importancia en el estudio del Brillo de fondo de cielo:

Antes de comenzar con el análisis propiamente dicho de las imágenes de este trabajo vamos a realizar un breve resumen de algunos aspectos teóricos de importancia para nuestro análisis.

En primer lugar definir el objeto de estudio de este trabajo, el brillo de fondo de cielo.

Como brillo de fondo de cielo se entiende como la luminosidad del cielo nocturno proveniente de fuentes no resolubles espacialmente como el airglow o luminiscencia nocturna, la luz zodiacal, la luz de las estrellas, de las galaxias, la contaminación lumínica y la luna ^{vii}. Esas son las fuentes de luz que contribuyen al brillo de fondo de cielo, sin embargo, es necesaria la existencia de elementos dispersores para que gran parte de dichas fuentes de luz reboten y vuelvan a la tierra ya que dicha luz no proviene directamente de su fuente. En la superficie terrestre, el elemento difusor más importante son las moléculas de aire, que difunden la luz según la dispersión de Rayleigh. Otra fuente muy importante de la difusión la provocan los aerosoles, cuya difusión corresponde dependiendo del tamaño de las partículas a la Rayleigh o la de Mie. Tradicionalmente estas son las fuentes típicas de la difusión consideradas en los estudios de brillo de fondo de cielo, sin embargo, recientes artículos ^{viii} han llamado la atención de tener en cuenta una de las que quizás a priori era más obvia, las nubes.

Estas partículas y moléculas no solo difunden la luz de los objetos, sino que además absorben parte de la luz. Dentro de los elementos de absorbentes incluidos de manera genérica como moléculas y partículas destaca de manera muy importante y es el Ozono. Por ello es tratado de manera especial ^{ix}.

4 Medida de las imágenes

La medida del brillo de fondo de cielo mediante cámaras CCD se realiza tradicionalmente mediante la calibración absoluta, midiendo varias estrellas a diferentes alturas. Este procedimiento está detallado con gran exactitud en el manual de F. Falchi y P. Cinzano^x que utilizaron para adiestrar a numerosos astrónomos amateur para la calibración del “Atlas mundial de el brillo de fondo de cielo”^{xi}

En dicho manual nos indica como deducir la Constante instrumental y la extinción, ese trabajo ya fue realizado por Miguel Nievas en su trabajo de 2012^v en la sección 2.5.6. Tal y como se explica en esa sección, para realizar dicha calibración es necesario disponer de una noche fotométrica para poder deducir los parámetros necesarios para dar un valor calibrado a partir de las cuentas medidas en la imagen. Sin embargo, una vez obtenidos, la extinción, varía cada noche, pero la constante instrumental debería de permanecer. De esta manera podemos obtener el brillo de fondo de cielo utilizando la fórmula 2.5 de Nievas 2012^v

$$SB = C_{\lambda} + 2.5 \log_{10}(F_{\text{cielo}}(c/s)/A)$$

Donde F_{cielo} son las cuentas por segundo medidas en el pixel indicado, C_{λ} es la constante instrumental, y A es el área en segundos de arco al cuadrado que corresponde a un pixel de la cámara. De esta manera obtenemos SB (Brillo de fondo de cielo/ Sky Brightness) en magnitudes por arco segundo cuadrado, para la banda correspondiente. Tal y como menciona Nievas 2012 pág. 75, la constante instrumental es correcta cuando se resta un offset de referencia medido en las esquinas no iluminadas de la imagen, esto hace las veces de Dark.

Para este trabajo se ha utilizado la constante instrumental determinada por Nievas 2012^v entre enero y abril de 2012, medidos el 26 de mayo de 2012 (pág. 80) por ser un valor más cercano en el tiempo que el que comenta Moreta 2011 (pág. 52). Por tanto la constante instrumental es 10.366 ± 0.048 mag.

Las magnitudes la unidad tradicional de densidad de flujo espectral, sin embargo esta unidad no pertenece al sistema internacional ni a ninguno de sus múltiplos triviales, por ello para este trabajo en varias ocasiones utilizaremos otra unidad que si es múltiplo del sistema internacional de unidades, el Jansky¹. Para transformar de las magnitudes a los Jansky, en primer lugar hay que corregir del error de cero por el diferente sistema fotométrico utilizado. Como suponemos que las magnitudes utilizadas por Nievas 2012 son magnitudes en el sistema Vega, habría que corregir del punto cero, sin embargo, para la banda fotométrica Johnson V, la corrección es de tan solo 0.044 magnitudes (Frei & Gunn 1995), que es menor que nuestra precisión, por lo que no corregiremos de dicho punto cero.

Una vez supuesto que nuestras magnitudes son equivalentes en el sistema AB y Vega, para pasar de AB a flujo tan solo hay que invertir la ecuación siguiente:

$$AB = -2.5 \log_{10} f_{\lambda} - 5 \log_{10}(\langle \lambda \rangle) - 2.406$$

$$f_{\lambda} = 10^{\frac{AB + 2.406 + 5 \log_{10}(\langle \lambda \rangle)}{-2.5}}$$

¹ 1 Jy = 10^{-26} W m⁻² Hz⁻¹ (SI) = 10^{-23} erg s⁻¹ cm⁻² Hz⁻¹

Donde AB es la magnitud en el citado sistema fotométrico. f_λ es la densidad de flujo espectral en unidades de $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{\AA}^{-1}$, y λ en la longitud de onda central de la banda de observación en nm, en este caso 551 nm. En este trabajo utilizaremos las magnitudes AB para dar los valores absolutos, para mejor comparación con los dispositivos SQM y otros trabajos. Sin embargo, para los ajustes y otras relaciones recomendamos usar una escala lineal como se hace en los trabajos de Viena u Hong Kong (ver apéndices). Hay gran discusión en el subcampo sobre las unidades más idóneas. Nosotros opinamos que los Jy son las unidades ideales ya que tienen carácter lineal y con sentido físico en cualquier longitud de onda.²

Para el cálculo del brillo de fondo de cielo se ha escogido el cuadrado X[1200-1300] Y[120-1300] que incluye al zenit calibrado (1220,1268 de la calibración inicial, como al calculado por Nievas 2012, en el pixel 1227, 1271). El área medida es de aproximadamente 8º cuadrados. Se calcula la mediana del valor de los píxeles ya que este estimador es menos sensible a la presencia de estrellas o reflejos puntuales en el campo, además de las razones ampliamente expuestas a ese respecto por Nievas 2012 pag.29-30^v.

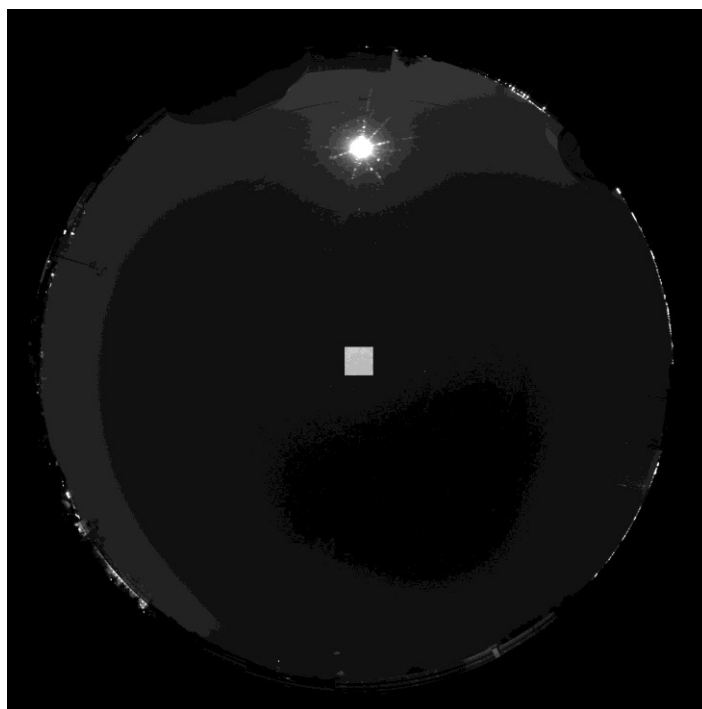


Figura 4 Zona de medida para el brillo de fondo de cielo (en gris)

Una dificultad añadida es la presencia de varios anillos de abrillantamiento debido a reflexiones en el metacrilato de la cúpula transparente. Para realizar una medida más precisa de la que vamos a hacer, se debería de realizar un ajuste como el que presentamos a continuación, excluyendo la región central que es la afectada por dichas reflexiones.

El área de la zona estudiada es de 7.125 X 7.125 grados. Para esta determinación hemos usado un recorte de una imagen de 400 x 400 píxeles centrados en el zenit y procesado con el programa Astrometry.net.

² . Actualmente algunos autores usan las Candelas, las cuales solo están definidas para una la visión fotópica, que no es la que se utiliza en la observación nocturna (escotópica) o para otros rangos de interés como pueda ser las longitudes de onda que afectan a los ciclos circadianos.

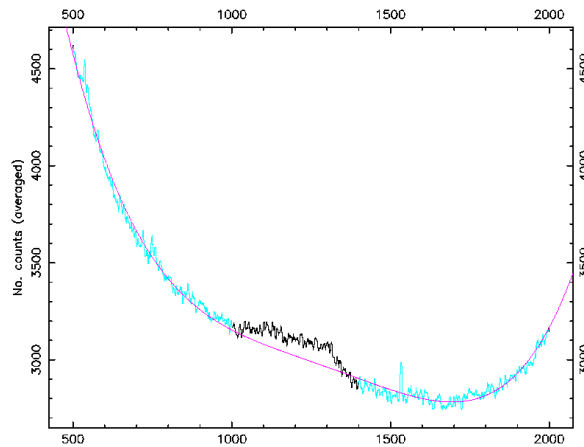


Figura 5 Corte horizontal de la imagen. En azul la zona ajustada, en roja. Se ha usado un polinomio de 4 orden. Destaca en negro la zona afectada por los reflejos.

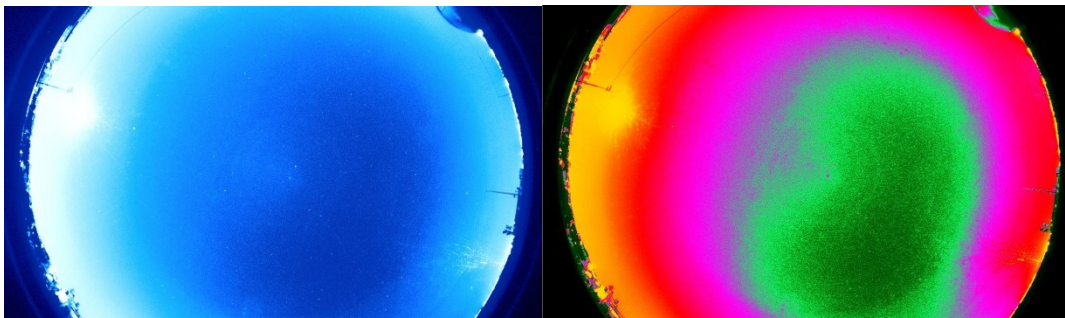


Figura 6 Imagen en color falso en que se destaca los reflejos existentes en el zenit.

Una vez tenidas en cuenta las limitaciones del método, en las secciones siguientes procederemos a comentar los resultados del análisis de las imágenes por el método del cálculo de la mediada de la caja indicada.

5 Efemérides

Las efemérides utilizadas para los cálculos utilizados en este trabajo están basadas en el paquete PyEphem^{xiii} que a su vez está basado en el famoso programa para Linux y Mac, Xephem^{xiii}. Las efemérides lunares de dicho programa están a su vez extraídas de S.L. Monshier^{xiv}. De dicho programa se han extraído, la altura de la luna, la fase y la magnitud en la banda V de la misma. El cálculo de la posición de la luna no tiene en cuenta los efectos de refracción atmosférica.

Los instantes han sido calculados de manera automática mediante la extracción de la hora de la toma de la cabecera de la misma. Para una mejor comparación entre diversos sets de datos, se ha transformado la fecha civil, en fecha juliana y de ha corregido para que el inicio de la escala corresponda con el número de día del año

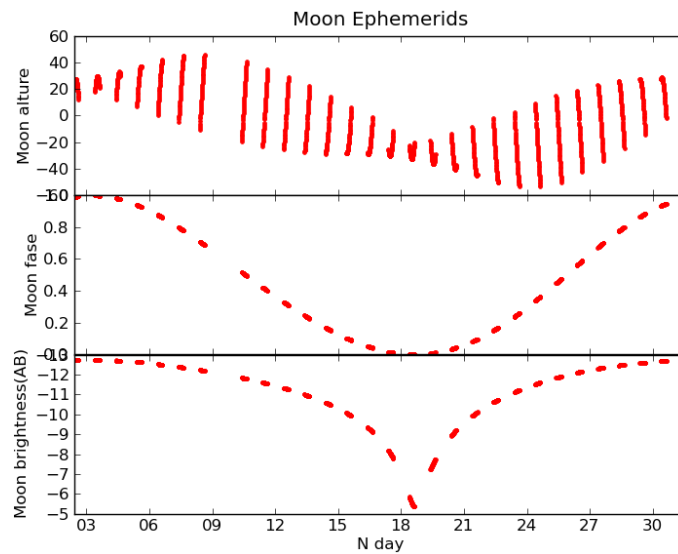


Figura 7 Muestra de las efemérides para las imágenes del conjunto de trabajo.

6 Análisis de las medias

Una vez medidas las imágenes, procedemos al análisis. Este lo hemos dividido según el tipo de imágenes que mencionan en la sección 2.2.

Antes de nada vamos a inspeccionar el aspecto de las relaciones entre el brillo de fondo medido y la altura de la luna, que a priori consideramos que debe ser la variable con más clara relación.

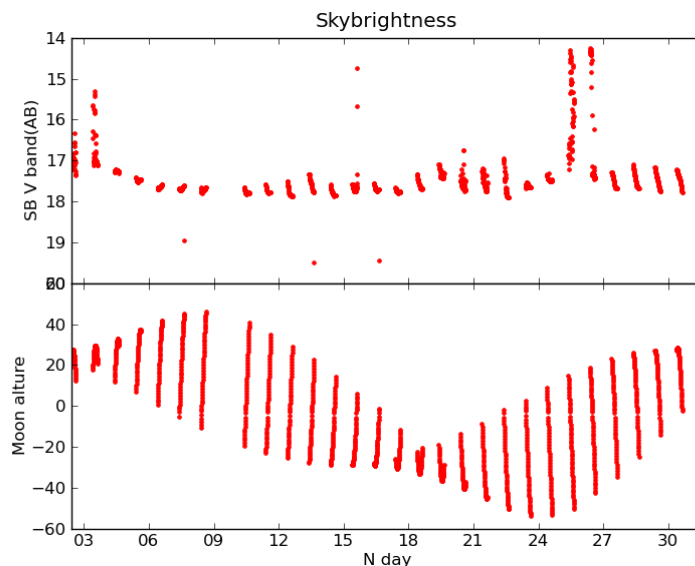


Figura 8 Comparación entre el brillo de fondo de cielo (arriba) y la altura lunar (abajo)

En la figura 8 vemos como el brillo de fondo de cielo puede aumentar varias magnitudes sin tener en absoluto relación con la luna, provocando además una variabilidad muy grande, de varios órdenes de magnitud con respecto a brillo de fondo de cielo típico. Esto se debe a la

reflexión que producen las nubes. En este ambiente polucionado, las nubes hacen aumentar el brillo de fondo de cielo, a diferencia de lo que hacen en ambientes no polucionados, en cuyo caso apantallan el brillo natural del cielo. Tradicionalmente se utilizaba el conteo de estrellas en la más para prever la llegada de tormentas.

Para el caso de Madrid, el albedo de las nubes, refleja la emisión del alumbrado nocturno que hace que se incremente mucho el brillo de fondo de cielo. Esto se ve claramente en las noches 3, 15, 25 y 26.

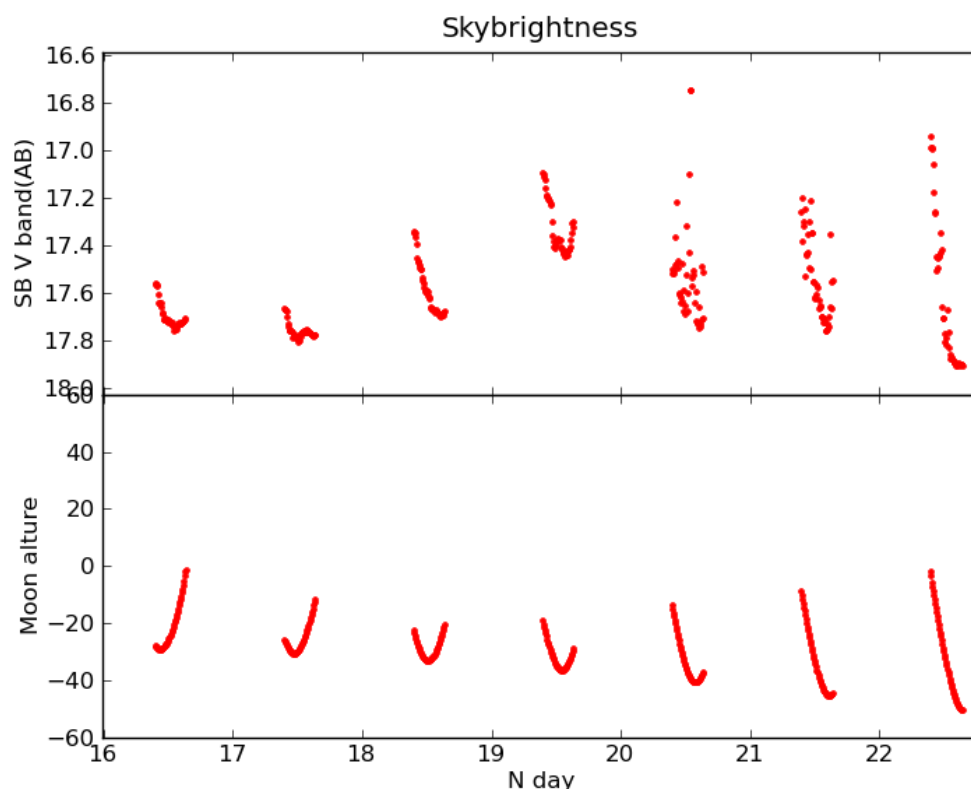


Figura 9 Muestra de la variabilidad del brillo de fondo de cielo en presencia de cirros.

Un efecto similar se ve en las noches que presentan cirros, aunque el brillo de fondo de cielo se mantiene en valores del orden de magnitud de las noches sin cirros, el valor de fondo de cielo varia grandemente. En la figura 9 se puede ver como las noches sin luna 20 a la 22 presentan una alta variabilidad en comparación con las noches claras 16, 17 y 18.

La noche 19 es bastante peculiar, ya que en la dirección NO se aprecia un resplandor importante a primeras horas de la noche que creemos que contribuye a que sea más brillante de lo normal. Ese exceso se observa también en las noches 5, 11 y 12. Cuatro de estas cinco noches fueron jueves, por los que suponemos que se debe a la celebración de algún tipo de evento al aire libre, dicha iluminación se apaga siempre entorno a las 23:15-23:30 TU. Se ha comprobado que no hay ninguna tormenta lejana en dicha dirección.

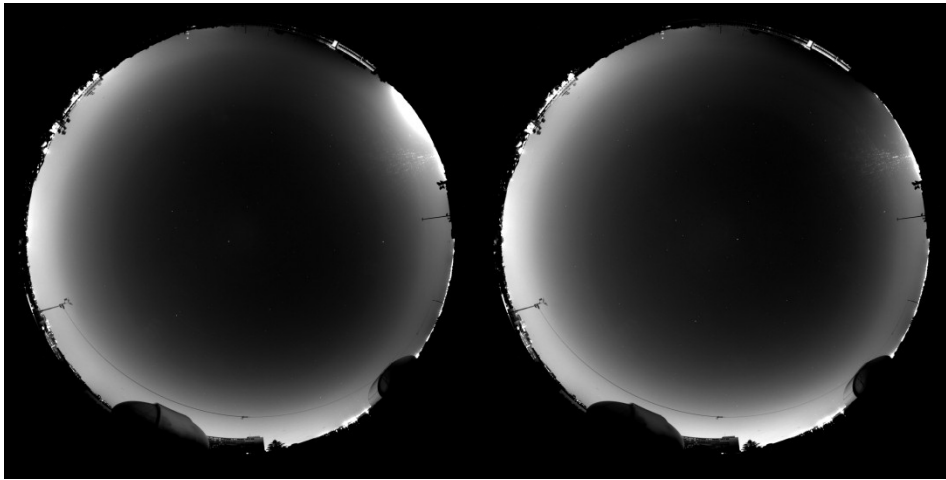


Figura 10 Imágenes del día 19, se puede apreciar en la esquina superior derecha como desaparece un importante foco de luminosidad.

Además dicha noche, acaba con un abrillantamiento inesperado. En las imágenes no se aprecia la presencia de cirros pero si de inhomogeneidades en la imagen con variaciones grandes. En la Figura 10 se puede ver una comparativa de la sustracción de imágenes consecutivas de esa misma noche. La imagen de la derecha corresponde a la parte inestable de final de la noche sobre las 3 TU. La cantidad de aerosoles no varió significativamente esa noche, por lo que una posible explicación sería a que se debe al airglow ya que la densidad de protones en el viento solar pasó de los típicos 1.1 proton/cm^3 a $4.2 \text{ protones/cm}^3$. Sin embargo, el día 14 hubo un aumento de la actividad solar mucho mayor, sin que se percibiese dicho efecto. Por lo que por el momento desconocemos el origen de dicha alteración del brillo de fondo de cielo.

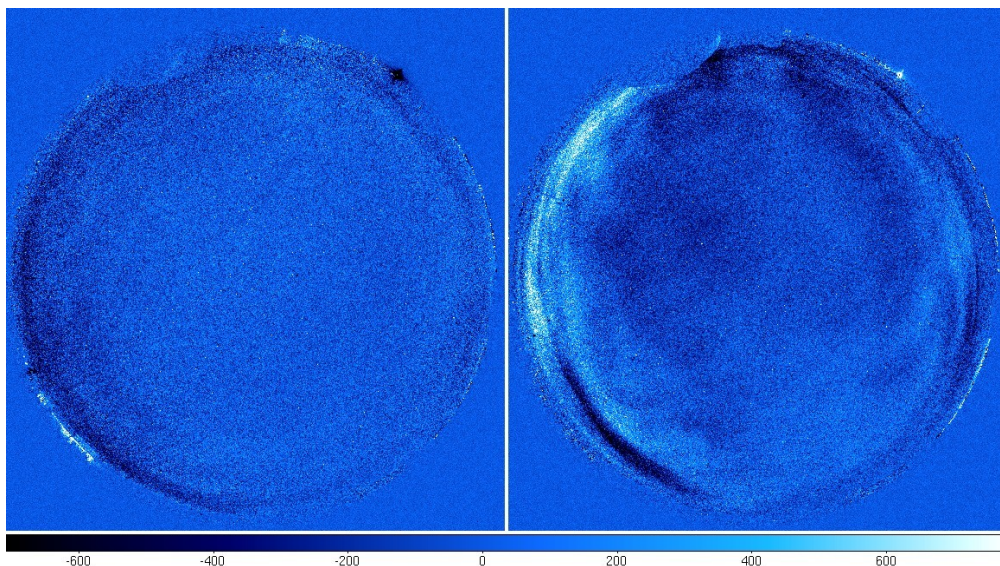


Figura 11 Resta de imágenes consecutivas del día 2015. A la derecha a media noche, con poca variación. A la izquierda al final de la noche con una variación muy importante.

Las noches en que se puede percibir claramente la relación entre la altura de la luna y el brillo de fondo de cielo en el zenit son las noches clara y con una fase importante.

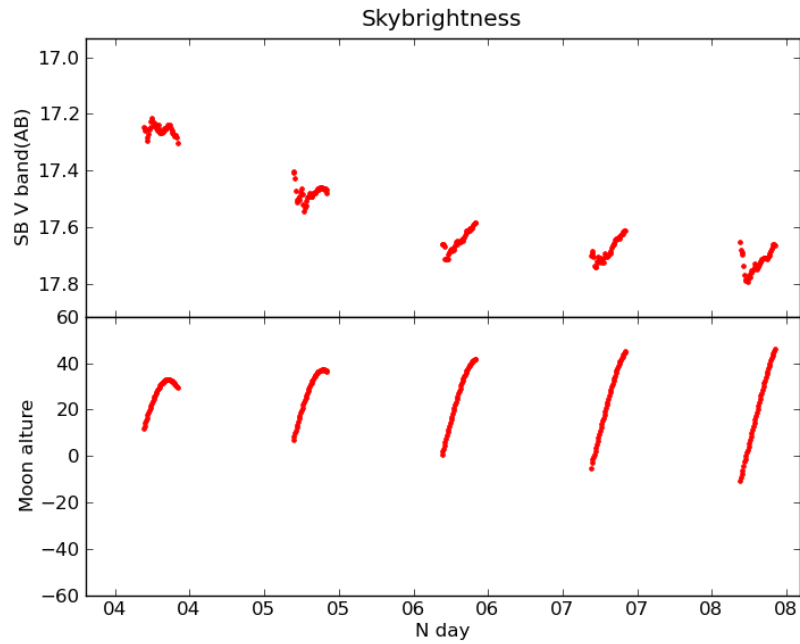


Figura 12 Ejemplo de noches en las que es apreciable la influencia de la luna en el Brillo de fondo de cielo en el zenit.

Las noches a partir del 27/209.5 presentan la citada suciedad producida por la caída de gotas de agua que o bien modificaron la capa uniforme de suciedad o bien llevaban consigo polvo. Independientemente de su origen, el efecto en el brillo de fondo de cielo medido es patente como se puede ver en la figura 12, y claramente afectado por la presencia de la luna.

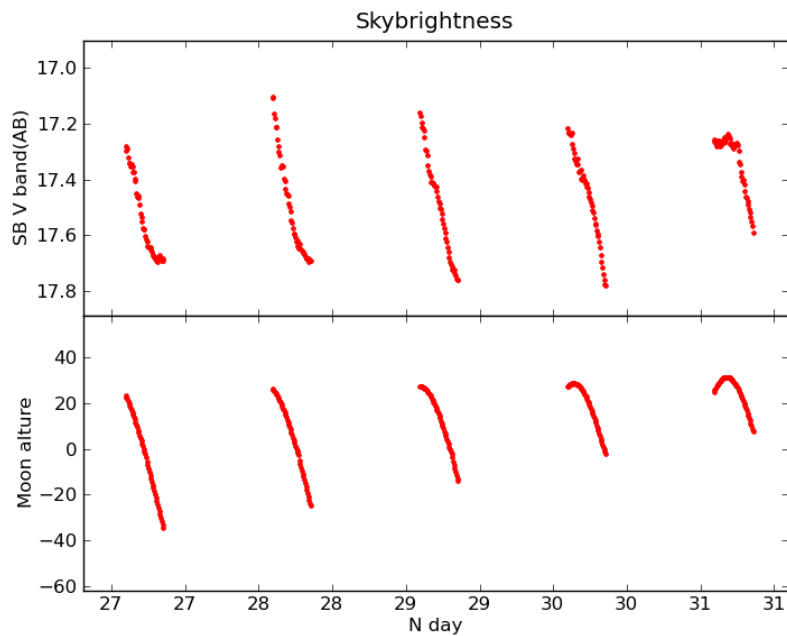


Figura 13 Ejemplo de noches con la cúpula de metacritato manchada en las que también se aprecia el efecto de la luna.

6.1 Variación Brillo de fondo de Cielo con la Fase y la Altura de la Luna en noches claras:

6.1.1 Relación entre el brillo de fondo de cielo con la altura.

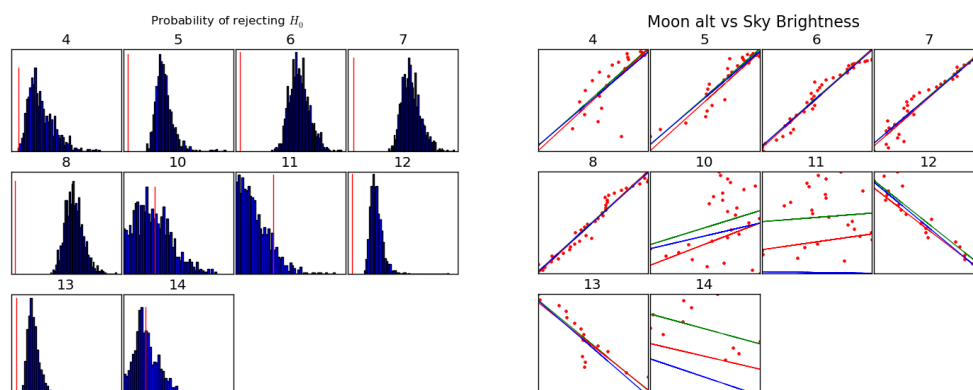


Figura 14 A la izquierda la distribución de probabilidad del estadístico de ajuste lineal, en rojo el valor crítico. Cálculo realizado por bootstrap. A la derecha, el resultado de los ajustes lineales y sus errores.

Como se puede apreciar en la figura 14 la correlación entre la altura de la luna y el brillo de fondo de cielo en el zenit para 7 de las noches clasificadas como “claras” es muy por encima del valor crítico siendo en todos los casos menor del 0.01% la probabilidad de aceptar la hipótesis nula de que no hay correlación para 6 de estos casos (5, 6, 7, 8, 12 y 13) y de un 0.5 % en el caso restante (4). Sin embargo para los casos 12 y 13, la correlación es inversa, es decir, contraria a la que se esperaría ya que la altura aumenta, pero el brillo de fondo de cielo disminuye, lo que indica que al revés de lo que parece, la luna a partir de esa fase no afecta al brillo de fondo de cielo. Los días 10 y 11 parece que son días en los que el brillo de la luna compensa el decremento del brillo de fondo de cielo generalizado.

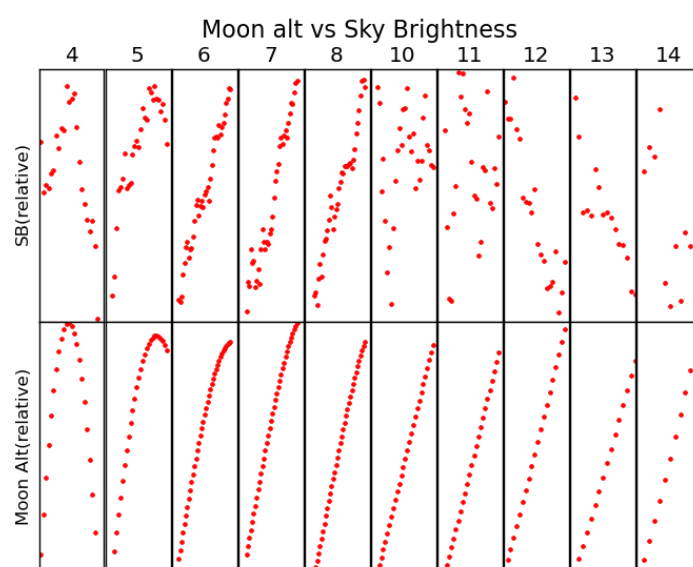


Figura 15 Alturas de la luna comparadas con sus correspondientes brillos de fondo de cielo. Escala relativa

Sin embargo, se puede ver en la figura 16 como sin la presencia de la luna pueden alcanzarse brillos de fondo de cielo muy elevados sin la presencia de la luna, como es el caso de la noche 18 o 19

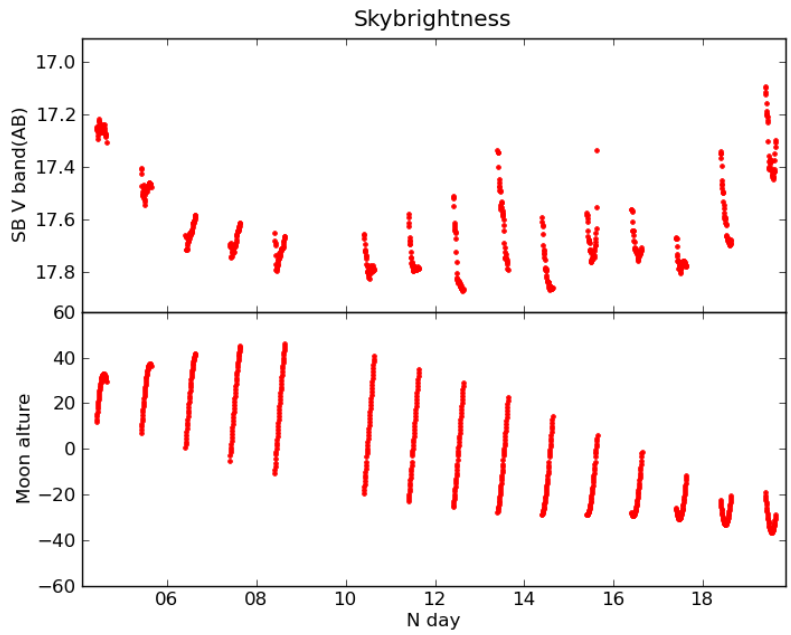


Figura 16 Alturas de la luna comparadas con sus correspondientes brillos de fondo de cielo. Escala absoluta.

6.1.2 Relación del brillo de fondo de cielo con la fase.

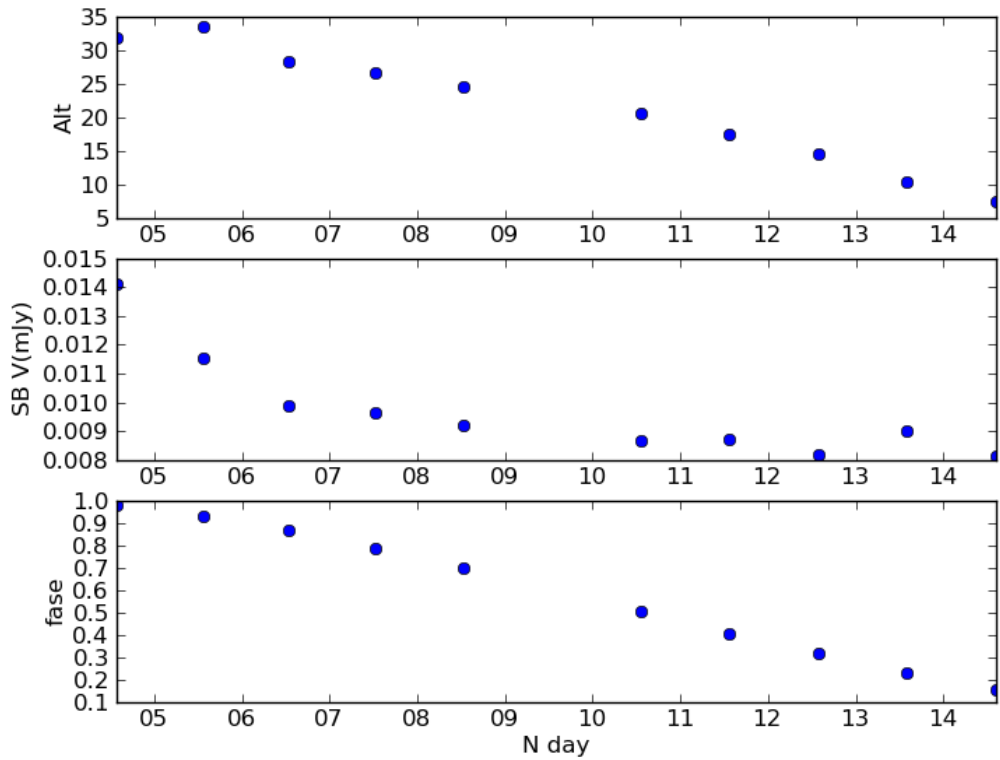


Figura 17 Efemérides medias de la luna frente al brillo de fondo de cielo medio.

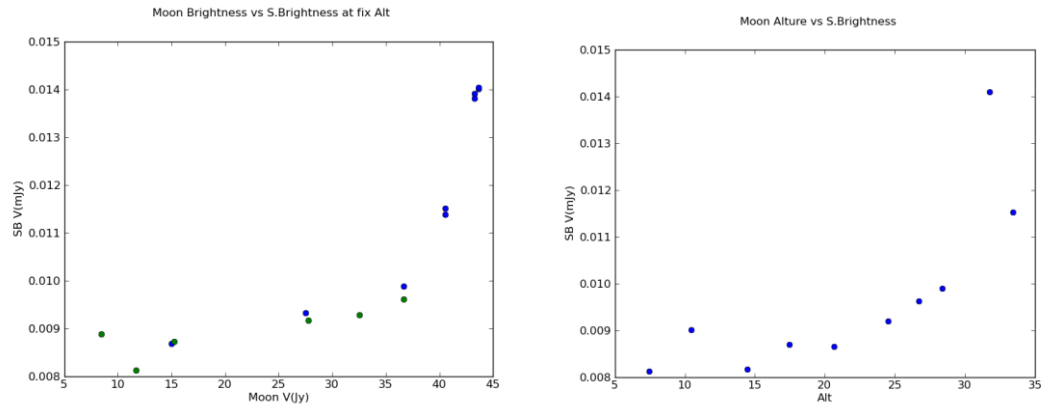


Figura 18 A la izquierda, para dos alturas fijas de la luna, 15 y 30 grados (verde y azul respectivamente), el correspondiente brillo de fondo de cielo. A la derecha, el brillo de fondo de cielo medio, para la altura media de la luna.

Tal y como se ve en la figura 17, tanto la altura como la fase medias aparentemente correlacionan muy bien con el brillo de fondo de cielo medio para las noches claras, incluso para las noches 11 y 12 que discutimos en el apartado anterior. Sin embargo, queda claro que esta correlación no puede ser lineal. En la siguiente figura 18, vemos como incluso fijando la altura vemos un comportamiento similar con la fase. Sin embargo, para este caso tan solo contamos con un muy limitado conjunto de medidas de tan solo un ciclo, por lo que puede pasarnos como nos ocurrió en el caso de la correlación de las noches 10 y 11 y sea tan solo una coincidencia temporal. De hecho en la sección 7 discutiremos si la variación con los aerosoles puede estar detrás de la misma variación absoluta del brillo de fondo de cielo.

6.2 Variación del brillo de fondo de cielo por la luna en noches en las que la cámara estaba sucia.

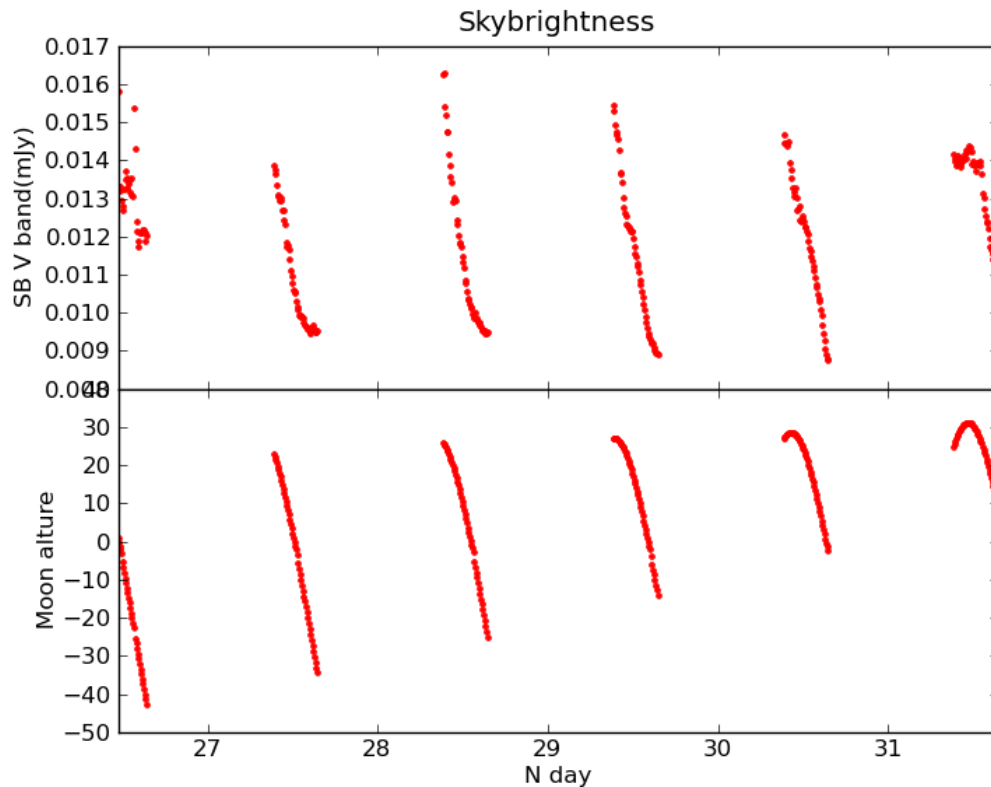


Figura 19 Alturas y brillo de fondo de cielo de las noches en las que la cúpula de metacrilato estaba sucia.

Dentro de las noches en las que la cúpula de metacrilato estaba sucia, se puede ver como la influencia de la luna es marcada solo a partir de cierta hora de la noche. La torre Picasso y un foco junto a Telecomunicaciones son algunas de estas fuentes que incrementan grandemente el brillo de fondo de cielo, en toda la cámara, pero más con la suciedad. Solamente a partir de media noche, cuando la iluminación artificial es menor, comienza a percibirse la influencia lunar.

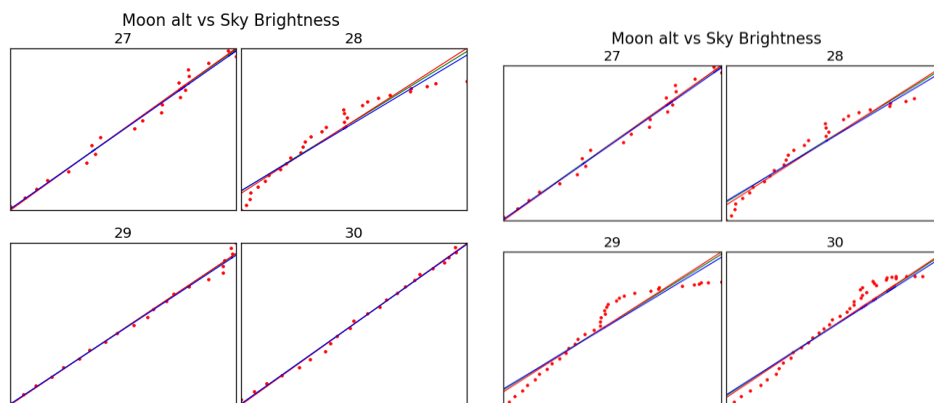


Figura 20 Ajustes por mínimos cuadrados a la evolución del brillo de fondo de cielo con la altura de la luna.

Si bien la correlación esta clara, como ya nos pasaba en la sección anterior, el difícil distinguir cuando la correlación es debida a puramente a la evolución natural o a la coincidencia entre el cambio gradual de la iluminación con el movimiento de la luna. De hecho, por el hecho de ser ambos valores decrecientes podemos obtener una correlación. Sin embargo, vemos para las noches 26, 27 y 28, que hay varios cambios de pendiente, sin que haya variaciones de esas características en la altura de la luna. A partir de cierta hora, no obstante, se linealiza el comportamiento. Para las noches 27 y 28 vemos que cuando se excluyen las imágenes que no siguen la tendencia, el ajuste es perfecto para esas noches.

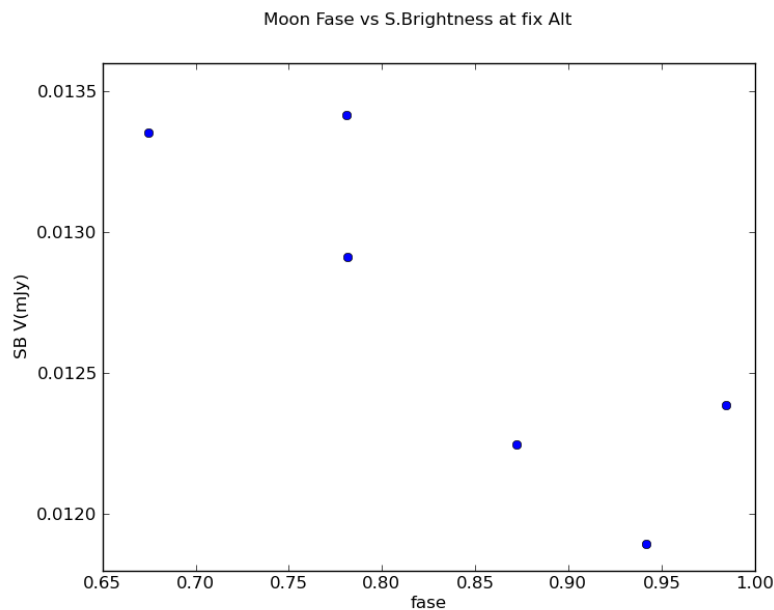


Figura 21 Se puede ver en este grafico como no hay una correlación positiva entre el brillo de fondo de cielo y la fase para una altura dada de 20°

Sin embargo, no se aprecia ninguna evolución clara con la fase para la altura de 20°. Pensamos que esto se debe a que estamos analizando unas imágenes en las que prácticamente toda la imagen se ve afectada por reflejos que promedian las fuentes intensas de todo el cielo, ya sea la luna, ya sea el horizonte.

7 Variación del brillo de fondo de cielo en el zenit con la profundidad óptica por aerosoles.

Una vez observado en el apartado anterior como existen noches claras como la 192 que presentan una evolución muy importante, nos preguntamos si otros factores ambientales no pudieran ser más importantes que la presencia de la luna para el valor absoluto del brillo del cielo en Madrid. Uno de los factores que intervienen en la contaminación lumínica además de las fuentes, es la cantidad de elementos dispersores. Al estar a una altura fija y estudiar el zenit, la masa de aire la consideraremos constante y por tanto también la dispersión Rayleigh. El otro elemento dispersor que consideramos son los aerosoles. Otra posible fuente de variaciones podría ser la cantidad de Ozono troposférico, pero tras consultar las estaciones de

medida de contaminantes del Ayuntamiento de Madrid no hemos podido establecer relación alguna con la variaciones observadas. Por tanto, hemos investigado el otro elemento atmosférico causante de la dispersión de la luz, los aerosoles.

De acuerdo con Stalin et. al. 2008, el espesor óptico típico es aproximadamente de una eficiencia de $A_0=0.087$, correspondiendo A_0 a la profundidad óptica de los aerosoles a la longitud de onda de una micra. Además, dicha extinción es aditiva linealmente con los otros tipos de extinción o difusión ya comentados, por lo que un incremento lineal en la profundidad óptica, daría lugar a un incremento lineal en el brillo de fondo de cielo.

Por fortuna, disponemos de una estación de medida de aerosoles muy cerca del Observatorio UCM, en el edificio del AEMET^{xv} de ciudad universitaria dentro de la red de medida AERONET (Aerosol Robotic NETwork)^{xvi} que proporciona de manera pública la profundidad óptica en 8 bandas. Nosotros hemos escogido la banda de 500 nm por ser la más cercana a nuestra banda de observación.

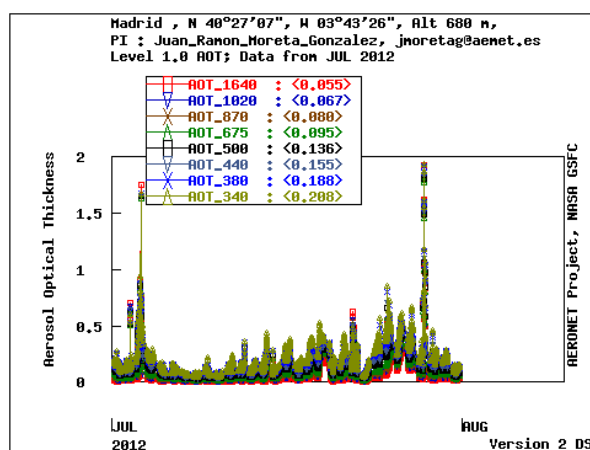


Figura 22 Representación de las diferentes bandas fotométricas proporcionadas por AERONET para la estación de Madrid.

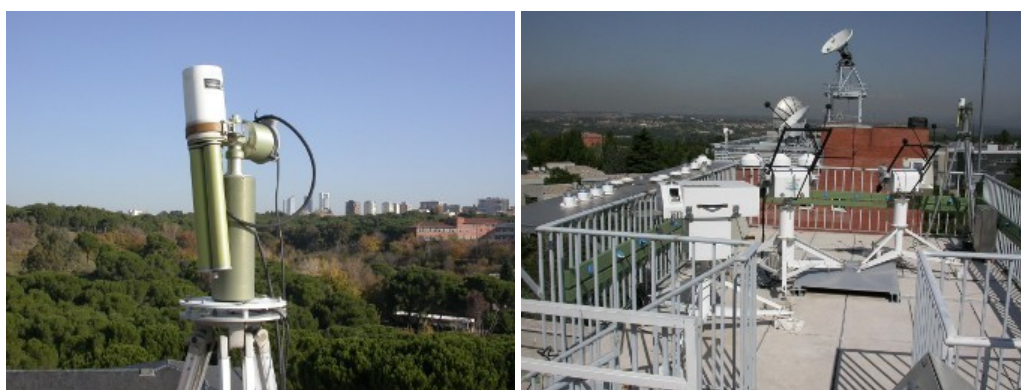


Figura 23 Imágenes de los fotómetros solares situados en la azotea del edificio de AEMET a cargo de Juan Ramón Moreta González, Servicio de Redes Especiales y Vigilancia Atmosférica.

Para la realización de esta medida se utilizan dos fotómetros solares usando el algoritmo desarrollado por Dubovik et al. 2000^{xvii}

Dado que estas medidas de aerosoles se realizan con el Sol, no tenemos datos nocturnos de aerosoles. Sin embargo supondremos que el contenido en aerosoles de la noche es similar al del día anterior y si acaso, se limpiarían durante la noche, dada la típica bajada de brillo de fondo de cielo.

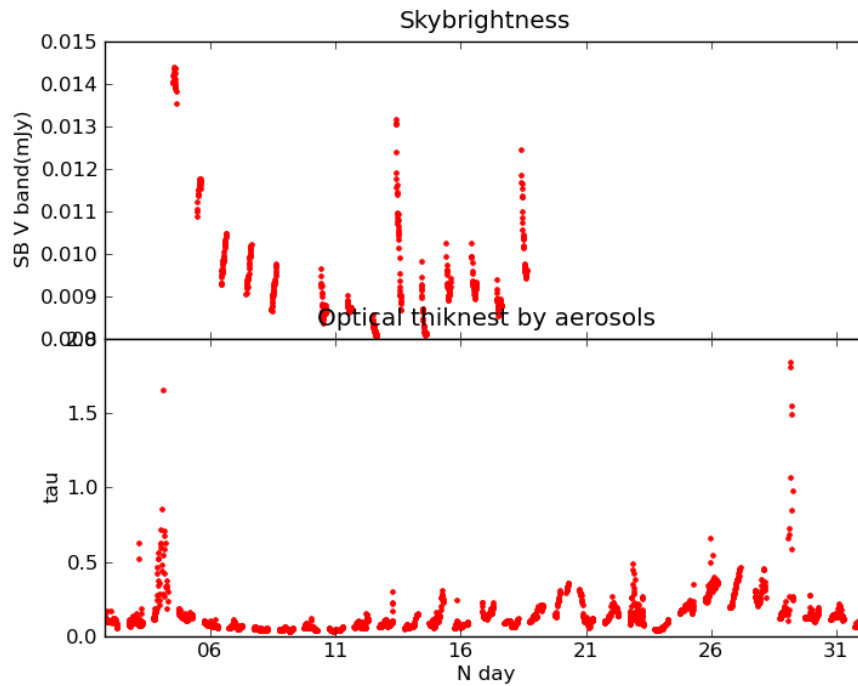


Figura 24 Comparativa entre el brillo de fondo de cielo y el espesor óptico en 500 nm.

Tal y como se aprecia en la figura 24 la forma de la caída de brillo las noches 4-8 coincide también con el descenso en el contenido de aerosoles de dichos días. Sin embargo, el aumento en la cantidad de aerosoles del día 13 o 18 no se corresponde con el gran aumento de brillo de fondo de cielo.

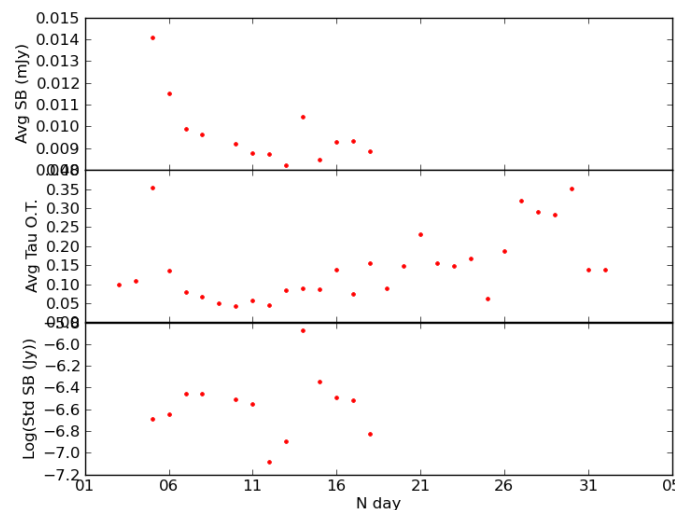


Figura 25 Comparativa entre el brillo de fondo de cielo medio, la profundidad óptica media, y la desviación típica de las noches claras.

A pesar de ello, cuando observamos los valores medios, seguimos viendo una importante similitud. Apoyados por la teoría, intentamos realizar un ajuste.

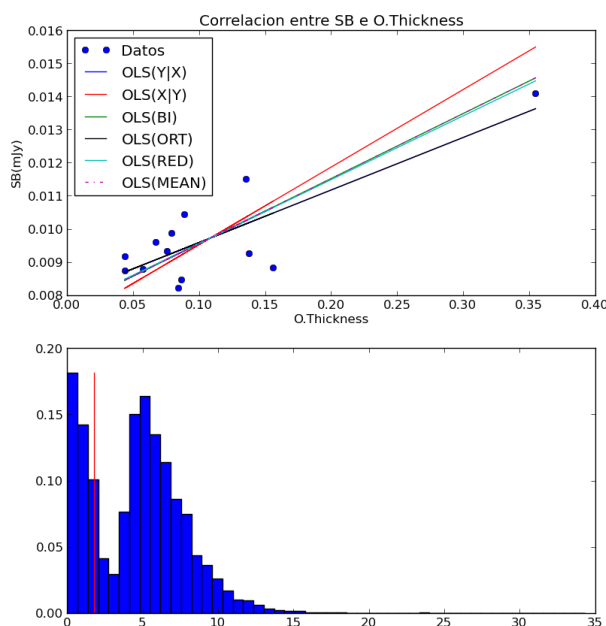


Figura 26 Ajuste por mínimos cuadrados a los datos mediante los ajustes recomendados por Isobe 1991 y la distribución de probabilidad del estadístico de significación, siendo el valor crítico la línea roja.

Vemos que el ajuste es muy pobre y probablemente si no fuera por el punto de la derecha no podíamos confirmar dicha correlación. Aun y con todo el test no paramétrico de Spearman nos indica que se puede descartar la no correlación al 95% con el estadístico $T=1.86$ y valor crítico 1.80.

Por tanto nos encontramos como en el caso anterior. Un solo episodio importante de aumento de la opacidad por aerosoles coincidente con la luna llena.

También es importante señalar que días antes de las lluvias que mancharon la cúpula de metacrilato hay también una cantidad importante de aerosoles o al menos de opacidad, ya que por el momento desconocemos si los datos están corregidos de la presencia de nubes y

lo que vemos en ese caso es la opacidad de las nubes en vez de la de los aerosoles.

En trabajos futuros, sería de gran interés disponer de los datos de contenido en aerosoles que proporciona la estación de LIDAR del CIEMAT, ya que son aerosoles medidos durante la noche y por tanto a la vez que nuestras medidas. Tanto es así que el laser del LIDAR del CIEMAT se puede observar en gran parte de nuestras imágenes.^{xviii} El alumno ha entablado contacto con los responsables de la estación sin que por el momento nos hayan podido proporcionar ningún dato.

8 Evolución del brillo de fondo de cielo medio.

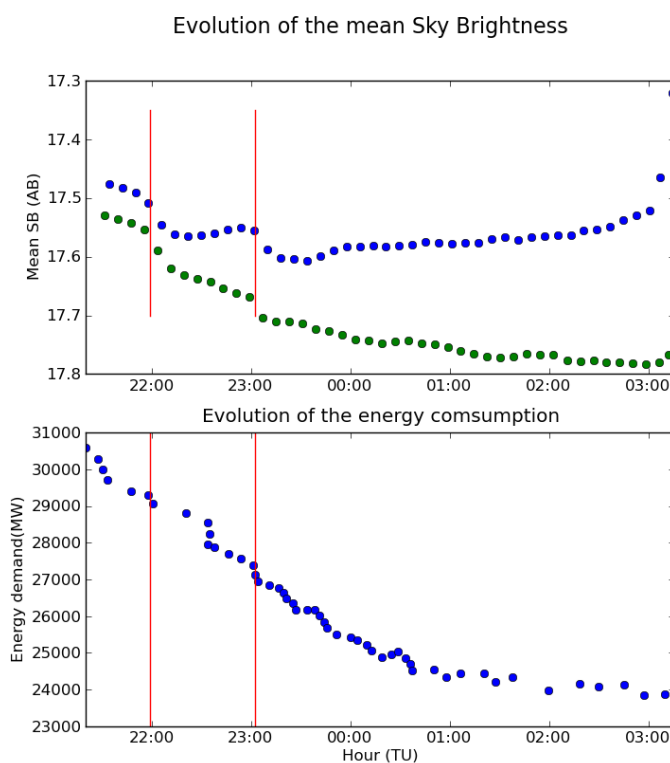


Figura 27 Evolución media de noches con Luna (azul) y noches sin Luna (verde).

En la figura 27 vemos como es la evolución del brillo de fondo de cielo durante la noche. Tanto para una noche con luna como para una noche sin ella. En las noches con luna, tal y como hemos comentado en las secciones 6.1 y 6.2. Esta evolución solo es perceptible cuando la atmósfera esta en calma y la fase de la luna es importante, por encima de 0.5 aparentemente.

Las líneas rojas marcan dos características comunes en ambas curvas, como son la casi da gradual de luminosidad de las doce de la noche y la una de madrugada. Curiosamente, Puschnig et al. 2013 observan tambien dos saltos desde el observatorio de Viena, pero a las 11 y a las 12, ya que ellos describen la evolución en horario de invierno, estos mismo se observan tambien el la ciudad de Hong Kong a identicas horas^{xix} en el casod e Bielin, el salto de observa a las 24:30 hota local (Ver figuras en el apendice).



Figura 28 Imágenes de Madrid de noche tomadas a diferentes horas de la noche. Tomadas a las 20:59 TU, 23:12 TU y 2:22 TU. Se aprecia claramente el descenso de luminosidad con las horas, especialmente de alumbrado ornamental.

El al figura 28 podemos ver tres imágenes de Madrid tomadas por los astronautas de la Estación Espacial Internacional en las que se aprecia claramente como durante la noche se van apagando gran parte de las luces. Sin embargo, vemos en la curva que el brillo de fondo de cielo aun continua descendiendo paulatinamente más allá de las 2TU=0.58 Día juliano. Una posible explicación a esto puede ser que dicha variación se deba pues a que la actividad humana no alcanza su mínimo de actividad hasta pasadas las 3 TU. Esto es facil de observar en el gráfico de demanda energética que presentamos a continuación.

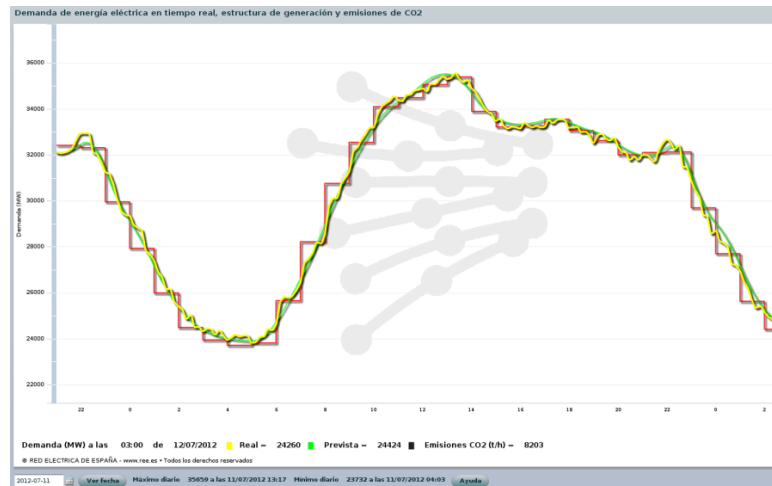


Figura 29 Demanda de energía para el estado español durante el día 11 de julio de 2012. Fuente: Red Eléctrica Española. www.ree.es

Un procedimiento por el cual la actividad humana puede afectar en forma de contaminación lumínica es atreves de las ventanas de las casas y comercios tal y como propone Darula 2013^{xx}.

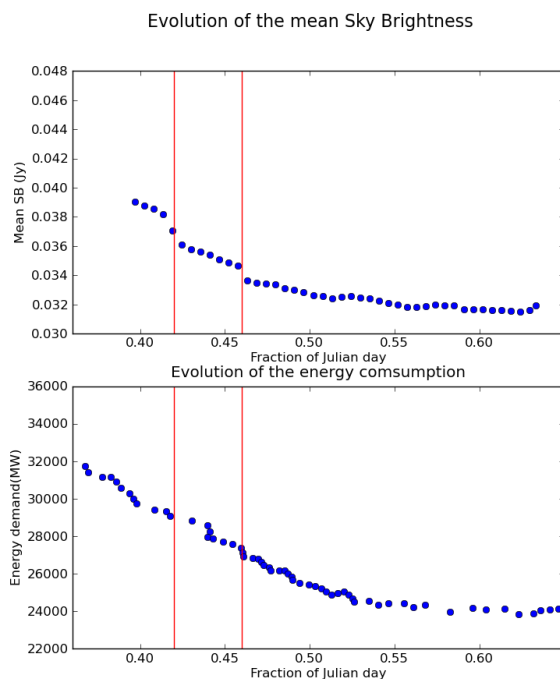


Figura 30 Comparación entre la evolución de la demanda energética y el brillo de fondo de cielo en una noche despejada.

En la figura 30 podemos ver la comparación entre la demanda energética general y la evolución del brillo de fondo de cielo.

Puede destacarse que también en la evolución del gasto energético parece haber una variación más o menos brusca del consumo entorno a la 1 TU. Y como en el caso del brillo de fondo de cielo descende suave y continuamente hasta entradas las 0.6 FDJ~2:30 TU.

No ha de extrañarnos en exceso esta relación entre el consumo eléctrico general y la contaminación lumínica, pues ya Elvidge et. al. 1999^{xxi} encontró relación entre el consumo eléctrico general y la emisión luminosa de las ciudades detectada por el satélite DMSP-OLS. Esa emisión es la

principal causa de la contaminación lumínica.

Otras posibles fuentes de dicha evolución son los cambios en la composición química de la atmósfera nocturna, tal y como se ve en Brown et al. 2012 fig. 11.^{xxii} Donde se ve como varía el contenido de O_3 durante la noche y por tanto la opacidad.

9 Conclusiones y trabajo futuro:

Hemos podido determinar cómo a pesar de la gran variabilidad del brillo de fondo de cielo en Madrid, debido a la presencia de cirros, nubes y otros fenómenos como reflejos y manchas de suciedad en la cúpula de metacrilato del AstMon, es posible determinar que existe una relación lineal entre la altura y el brillo de fondo de cielo. Aparentemente también existe una relación entre la fase y el brillo de fondo de cielo, pero debido a la confluencia de factores externos como el incremento de aerosoles durante el momento de máximo brillo lunar. Para una mejor determinación de la relación entre el Brillo de Fondo de cielo y la fase lunar, así como con el contenido de aerosoles, sería interesante disponer de una serie temporal más amplia.

Hemos detectado algunas variaciones en el brillo de fondo de cielo que por el momento no podemos explicar, pero la forma general de la curva de evolución parece que se explica razonablemente bien por el apagado de la iluminación ornamental, tal y como ocurre en otras ciudades como Hong Kong o Viena, como por la forma general de decrecimiento por su similitud con la curva de demanda general de energía. Para confirmar estas sospechas sería interesante realizar un análisis fotométrico tanto de la emisión directamente inyectado en la atmósfera en vertical (véase, imágenes de la ISS) como de las ventanas y luces que emiten en la horizontal (un buen ejemplo podría ser la fotometría del horizonte del AstMon.).

Además de todo esto, en un futuro, puede ser interesante realizar un análisis bidimensional de la variación del brillo de fondo de cielo con la Luna y compararlo con los modelos existentes^{xxiii} o en desarrollo^{xxiv}, para evitar falsas correlaciones.

Apéndices:

10 Figuras de algunos artículos citados.

10.1 Cambio de brillo de fondo de cielo en varias ciudades:

10.1.1 Viena:

Puschnig, J., Posch, T., & Uttenthaler, S. (2013). Night sky photometry and spectroscopy performed at the Vienna University Observatory: pag 13:

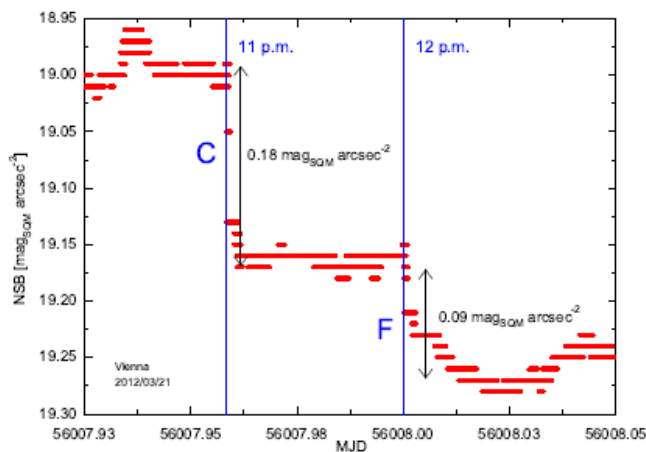
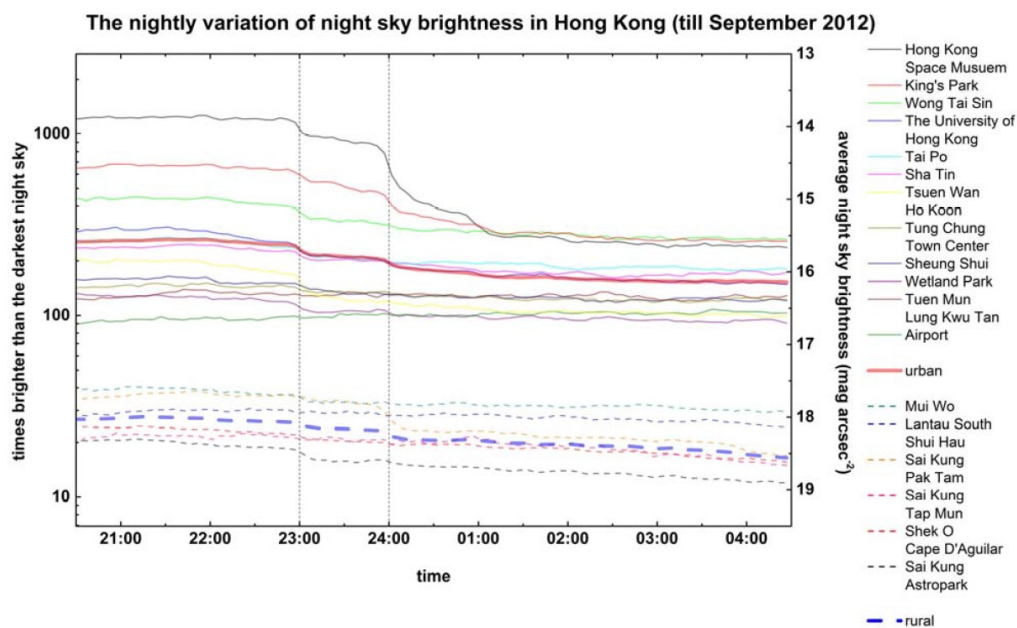


Figure 5: Detection of the curfew at 11 p.m. (C) and reduction of facade lighting at 12 p.m. (F) in Vienna on March 21st, 2012.

10.1.2 Hong Kong:

Hong Kong press release:



10.1.3 Berlin:

Kyba, C. C. M., Ruhtz, T., Fischer, J. and Hölker, F. (2012), Red is the new black: how the colour of urban skyglow varies with cloud cover. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 425: 701–708. doi: 10.1111/j.1365-2966.2012.21559.x

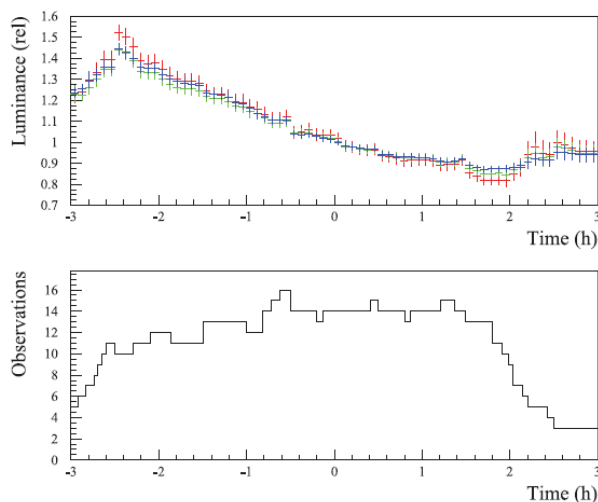


Figure 8. Changes in sky luminance over the course of the night. The top plot shows the ratio of the observed sky relative to the luminance observed in the middle of the night ($t = 0$, 01:00 local time) for the red, green and blue filtered data, for portions of selected clear nights as described in Section 2.5. Vertical error bars show the standard deviation of the mean. Note that the zero is suppressed to make the trend more clear. The bottom plot shows the number of observations (nights) satisfying the selection criteria.

10.2 Otras figuras

Brown, S. S., & Stutz, J. (2012). Nighttime radical observations and chemistry. *Chemical Society Reviews*, 41(19), 6405-6447.1 Krisciunas, K., & Schaefer, B. E. (1991). A model of the brightness of moonlight. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 1033-1039.

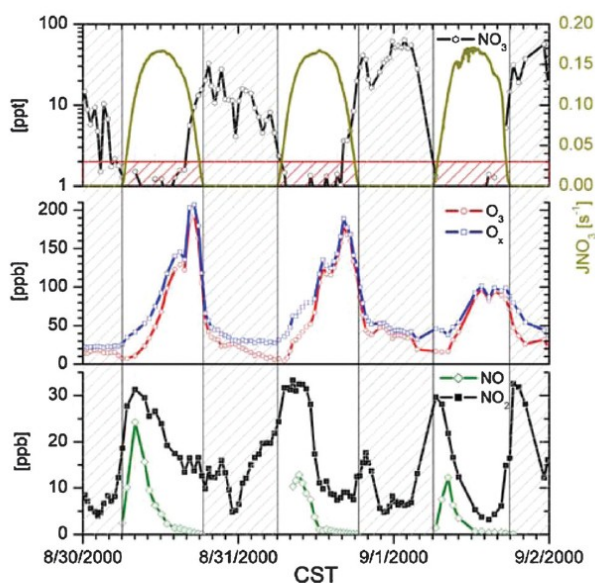


Fig. 11 Three days of measurements of NO_3 , its first-order loss rate coefficient to photolysis ($J\text{NO}_3$), O_3 , O_x ($= \text{O}_3 + \text{NO}_2$), NO and NO_2 near Houston, Texas, USA, in 2000. NO_3 grew rapidly during daylight hours in the late afternoon.⁵² Reprinted with permission from the *Journal of Geophysical Research*.

11 Bibliografía:

- ⁱ P. Beier (2006): Effects of Artificial Night Lighting on Terrestrial Mammals, Chapter 2, Ecological Consequences of Artificial Night Lighting, C. Rich, T. Longcore, Ed. (Island Press).
- ii Puschnig, J., Posch, T., & Uttenthaler, S. (2013). Night sky photometry and spectroscopy performed at the Vienna University Observatory. arXiv preprint arXiv:1304.7716.
- iii Aceituno, J., Sánchez, S. F., Aceituno, F. J., Galadí-Enríquez, D., Negro, J. J., Soriguer, R. C., & Gómez, G. S. (2011). An All-Sky Transmission Monitor: ASTMON. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 123(907), 1076-1086.
- iv Ramírez Moreta, P. (2011). Brillo de fondo de cielo con AstMon-UCM.
- v Nieves Rosillo, M. (2012). Fotometría absoluta y brillo de fondo de cielo con AstMon-UCM.
- vi En la cabecera de la imagen se detalla: FITS (Flexible Image Transport System) format is defined in 'Astronomy and Astrophysics', volumen 376, page 359; bibcode: 2001A...376...359H
- vii Benn C. R. Ellison, S.L. La Palma Technical note 115.
- viii Kyba, C. C. M., Ruhtz, T., Fischer, J. and Höcker, F. (2012), Red is the new black: how the colour of urban skyglow varies with cloud cover. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 425: 701–708. doi: 10.1111/j.1365-2966.2012.21559.x
- ix Buton, C., Copin, Y., Aldering, G., Antilogus, P., Aragon, C., Bailey, S., ... & Wu, C. (2012). Atmospheric extinction properties above Mauna Kea from the Nearby Supernova Factory spectro-photometric data set. Astronomy & Astrophysics, 549.
- x Cinzano, P. THE IDA WORLDWIDE PROJECT FOR CCD AMATEUR MEASUREMENTS OF NIGHT SKY BRIGHTNESS. <http://www.lightpollution.it/cinzano/en/sbeam2.html>
- xi Cinzano, P., Falchi, F., & Elvidge, C. D. (2001). The first world atlas of the artificial night sky brightness. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 328(3), 689-707.
- xii <http://rhodesmill.org/pyephem/>
- xiii <http://www.clearskyinstitute.com/xephem/>
- xiv <http://www.monshier.net>, Precisión de 0.05'' desde -1369 a +2950. Moshier, S. L. (1992). Comparison of a 7000-year lunar ephemeris with analytical theory. Astronomy and Astrophysics, 262, 613-616.
- xv http://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/photo_db/Madrid.html
- xvi http://aeronet.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/type_one_station_opera_v2_new?site=Madrid&nachal=0&year=20&month=6&aero_water=0&level=1&if_day=0&if_err=0&place_code=10&year_or_month=0

xvii Dubovik, O., and M. D. King (2000), A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements, *J. Geophys. Res.*, 105(D16), 20673–20696, doi:10.1029/2000JD900282.

xviii <http://www.ciemat.es/CIEMATportal/portal.do?TR=C&IDR=1775>

xix

http://www.scifac.hku.hk/file/news/1965/NSN_press_release_eng__revised_20_March_2013_.pdf

xx Windows in buildings: potential source of light pollution, Darula 2013, LPTMM 2013 proceedings April 15 – 18, 2013, Smolenice, Slovakia
<http://cegepsherbrooke.qc.ca/~aubema/LPTMM2013//uploads/Site/darula32.pdf>

xxi Elvidge, C. D., Baugh, K. E., Dietz, J. B., Bland, T., Sutton, P. C., & Kroehl, H. W. (1999). Radiance calibration of DMSP-OLS low-light imaging data of human settlements. *Remote Sensing of Environment*, 68(1), 77-88.

xxii Brown, S. S., & Stutz, J. (2012). Nighttime radical observations and chemistry. *Chemical Society Reviews*, 41(19), 6405-6447.

xxiii Krisciunas, K., & Schaefer, B. E. (1991). A model of the brightness of moonlight. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 1033-1039.

xxiv Jones, A., Noll, S., Kausch, W., Szyszka, C., & Kimeswenger, S. (2013, April). Studying Aerosol Properties with Astronomical Observations Using a Scattered Moonlight Model. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (Vol. 15, p. 8478).